

# 可生存的虚拟网络多层映射方法研究

刘光远<sup>1</sup>, 徐明伟<sup>2</sup>

(1. 石家庄铁道大学信息科学与技术学院, 河北石家庄 050043; 2. 清华大学信息科学技术学院, 北京 100084)

**摘要:** 本文研究了可生存虚拟网络多层映射问题, 首先对其建立了整数线性规划模型(ILP), 然后针对较大规模问题提出一种高效的启发式算法 VNP-SVNME 对其进行求解. 实验表明, VNP-SVNME 算法的资源映射开销相对 ILP 仅平均高 15%, 且优于现有的启发式可生存算法. 此外, VNP-SVNME 算法的映射时间相对 ILP 大大降低, 可以满足在线虚拟网络映射的需求.

**关键词:** 虚拟网络多层映射; 可生存; 整数线性规划; 启发式

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2020)07-1343-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.07.012

## Research on Survivable Virtual Network Multi-layers Embedding Method

LIU Guang-yuan<sup>1</sup>, XU Ming-wei<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Technology, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;  
2. School of Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** This paper studies the multi-layers embedding problem of survivable virtual networks based on virtual network layer protection. We first establish an integer linear programming (ILP) for the SVNME problem. Then an efficient heuristic algorithm VNP-SVNME is proposed to solve the large-scale problem. Experiments show that the resource mapping cost of the VNP-SVNME algorithm is only 15% higher on average than the optimal solution, but it is better than the state-of-the-art heuristic. In addition, the time complexity is greatly reduced compared to ILP, which can meet the requirements of on-line virtual network mapping.

**Key words:** virtual network multi-layers mapping; survivability; integer linear programming; heuristic

### 1 引言

目前,越来越多的基础设施提供商使用 IP-over-OTN 多层网络进行数据中心互联<sup>[1]</sup>. 这种网络结构包括用于物理通信的光传输网络和在其之上的 IP 网络. 该网络模型的特点是拓扑灵活,可以根据需要和一定的建立规则,在已有 IP 层拓扑的基础上从 OTN 层新建 IP 链路,从而更好的支持网络虚拟化技术. 网络虚拟化中典型的资源分配问题是虚拟网络映射 (Virtual Network Embedding, VNE)<sup>[2]</sup>,它是将一个虚拟网络请求 (Virtual Network Request, VNR) 映射到底层的物理网络 (Substrate Network, SN) 之上,要求满足虚拟节点和链路能力需求以及最小化资源映射开销等约束. 单底层网络的虚拟网络映射问题目前已经得到了广泛的研究<sup>[2]</sup>,而现有研究对多底层的虚拟网络映射问题涉及

还较少<sup>[3]</sup>,多层网络的拓扑灵活性给虚拟网络映射问题提出了新的挑战. 此外,如果一个虚拟网络映射方案只考虑最小化映射资源开销而忽略底层网络链路或节点失效所带来的风险,可能会降低虚拟网络服务的 QoS,违反用户的 SLA 约束,甚至直接导致虚拟网络服务中断,带来巨大的经济惩罚,因此对虚拟网络映射进行可生存性保护是十分必要的.

已有单层可生存虚拟网络映射的研究主要分为两种,一种是基于 SN 层的保护,即由底层网络按照不同目标分配相应的可生存保护资源,比如底层专有路径保护<sup>[4]</sup>,底层共享路径保护<sup>[5]</sup>,利用多路径映射<sup>[6]</sup>,被动恢复<sup>[7]</sup>等. 另一种是基于 VN 层的保护,即由虚拟网络层直接分配保护资源,然后将工作链路和保护链路不相交的映射到底层网络上<sup>[8,9]</sup>. 最近一项研究成果<sup>[10]</sup>

收稿日期:2019-04-02;修回日期:2020-01-15;责任编辑:李勇锋

基金项目:国家重点研发计划 (No. 2018YFB1701403);国家自然科学基金 (No. 61373160);河北省自然科学基金 (No. F2020210014);河北省高等学校科学技术研究 (No. QN2016270)

证实,在虚拟网络层进行可生存性保护的响应时间和在底层网络层进行相同保护的时间接近,更重要的是,研究表明在虚拟网络层进行可生存性保护相比底层网络层保护能获得更高的资源利用率和更高的虚拟网络请求接受率.此外,相关研究表明,单链路失效数量占有失效数量的70%.因此,本文从VN层后备保护能力入手,研究应对底层单链路失效的虚拟网络多层映射(Survival Virtual Network Multi-layers Embedding, SVNME)问题,目标是在保证虚拟网络可生存性的同时最小化底层网络资源开销.

本文首先对基于VN层保护的SVNME问题进行数学规划建模,求得该问题的最优解.然后针对较大规模问题,提出一种高效的启发式算法VNP-SVNME来进行可生存映射,实验表明,该算法在映射效率和映射时间上做了一个平衡,其资源开销仅比最优解平均高15%,但是时间复杂度大大降低,可以满足在线虚拟网络映射需求.此外,我们还将该算法与基于SN层保护机制以及基于VN层保护机制的其它算法在资源开销方面进行了对比,证明了该算法的有效性.

## 2 背景知识和问题定义

### 2.1 底层网络

如图1所示,和单层网络不同,在IP-over-OTN多层网络中,底层节点或链路包含两部分,一部分是IP层节点和链路,另一部分是OTN层节点和链路.

我们将底层IP网络表示为无向图 $G=(V,E)$ ,其中 $V$ 和 $E$ 分别表示IP层节点和链路的集合.

同理,将底层OTN网络表示为无向图 $\bar{G}=(\bar{V},\bar{E})$ ,其中 $\bar{V}$ 和 $\bar{E}$ 分别表示OTN节点和链路的集合.IP节点通过短波长接口连接到OTN节点,且每个IP节点具有相应的计算资源.

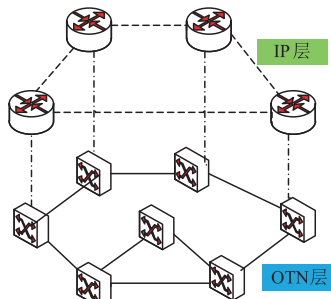


图1 底层网络组成

### 2.2 虚拟网络

类似于底层网络,我们将虚拟网络表示为无向图 $\hat{G}=(\hat{V},\hat{E})$ ,其中 $\hat{V}$ 和 $\hat{E}$ 分别表示虚拟节点和虚拟链路的集合.节点位置限制集合表示为 $L$ ,在虚拟链路 $(\hat{u},\hat{v})$ 上

为其它虚拟链路分配的保护带宽定义为 $s_{\hat{u}\hat{v}}$ .在本工作中,我们设定虚拟网络节点的度大于等于2,也就是说在两个虚拟节点间至少存在两条不相交的边,因为这是存在保护路径的必要条件.

### 2.3 问题描述

给定一个底层网络(多层网络)和虚拟网络请求以及位置限制集合 $L$ ,则:

(1)对于每条虚拟链路,在虚拟网络中找一条与其不相交的路径,最优的分配一个空闲保护带宽,当其受底层链路失效影响时可用.

(2)将虚拟网络映射到底层的IP-over-OTN网络,首先映射虚拟网络节点到底层IP网络节点上,如果能满足节点资源需求,则同时映射该节点相邻的每条虚拟链路到底层IP链路上,这个映射应满足虚拟链路的工作带宽和在该链路上分配的保护带宽能力需求.且为了保证底层IP网络单链路失效时虚拟网络的可生存性,一条虚拟链路不能和保护它的链路映射到同一条底层IP链路上.

(3)当以上条件无法满足,或映射开销较大时,则根据一定规则从OTN层新建IP链路重新进行映射,同时更新IP层和OTN层网络信息.

(4)最小化底层网络(IP和OTN)的映射开销.

## 3 多层网络的SVNME数学规划建模

基于上一节的背景介绍及问题定义,我们在这一节给出多层网络SVNME问题的整数线性规划(ILP)模型.首先是所用符号和变量说明,然后给出目标函数,最后是一系列的约束条件.

表1 符号说明以及变量说明

$b_{uv}$	表示底层IP网络中链路 $(u,v)$ 剩余带宽
$\bar{b}_{\bar{u}\bar{v}}$	表示底层OTN网络中 $(\bar{u},\bar{v})$ 剩余带宽
$b_{\hat{u}\hat{v}}$	虚拟网络链路 $(\hat{u},\hat{v})$ 的带宽请求
$s_{\hat{u}\hat{v}}$	表示在虚拟链路 $(\hat{u},\hat{v})$ 上分配的保护带宽
$L(\hat{u})$	虚拟节点 $\hat{u}$ 的位置约束集合
$\ell_{\hat{u}u} \in \{0,1\}$	$\ell_{\hat{u}u} = 1$ 表示满足位置约束限制, $u \in L(\hat{u}), u \in V, \hat{u} \in \hat{V}$
$CPU(\hat{u})$	虚拟节点 $\hat{u}$ 的计算资源需求
$CPU(u)$	底层网络节点 $u$ 上剩余计算资源
$x_{\hat{u}\hat{v}}^{uv} \in \{0,1\}$	$x_{\hat{u}\hat{v}}^{uv} = 1$ 表示虚拟链路 $(\hat{u},\hat{v})$ 映射到IP链路 $(u,v)$ 上
$y_{\hat{u}u} \in \{0,1\}$	$y_{\hat{u}u} = 1$ 表示虚拟节点 $\hat{u}$ 映射到IP网络节点 $u$ 上
$z_{\hat{u}\hat{v}}^{\bar{u}\bar{v}} \in \{0,1\}$	$z_{\hat{u}\hat{v}}^{\bar{u}\bar{v}} = 1$ 表示IP网络链路 $(u,v)$ 映射到OTN网络链路 $(\bar{u},\bar{v})$ 上
$\gamma_{uv} \in \{0,1\}$	$\gamma_{uv} = 1$ 表示IP网络 $u$ 和 $v$ 之间建立了一条IP链路
$x_{\hat{x}\hat{y}}^{\hat{x}\hat{y}} \in \{0,1\}$	$x_{\hat{x}\hat{y}}^{\hat{x}\hat{y}} = 1$ 表示虚拟链路 $(\hat{u},\hat{v})$ 的保护路径为虚拟链路 $(\hat{x},\hat{y})$

### 3.1 目标函数

通常在满足位置约束限制的条件下,节点映射的开销是固定的,所以总映射开销的变化主要取决于虚拟链路映射的开销变化.因此本文的目标函数设定为最小化虚拟网链路映射开销和新建 IP 链路映射开销之和,即最小化全局资源开销.具体如下:

$$\text{Minimize} \left( \sum_{\forall (\hat{u}, \hat{v}) \in \hat{E}} \sum_{\forall (u, v) \in E} x_{uv}^{\hat{u}\hat{v}} \times (b_{uv} + s_{uv}) + \sum_{\forall (u, v) \in E} \sum_{\forall (u, v) \in E} z_{uv}^{uv} \times b_{uv} \right) \quad (1)$$

### 3.2 约束

(1) 虚拟节点映射约束:式(2)和式(3)确保每个虚拟节点映射满足位置约束条件且底层节点计算能力能满足虚拟节点能力需求.

$$\forall \hat{u} \in \hat{V}, \forall u \in V: y_{uu} \leq \ell_{uu} \quad (2)$$

$$\forall \hat{u} \in \hat{V}, \forall u \in V: y_{uu} \times CPU(\hat{u}) \leq CPU(u) \quad (3)$$

(2) 虚拟链路映射约束:式(4)确保了多条虚拟链路可以映射到一条底层 IP 链路上.式(5)保证被映射的底层 IP 链路能够满足虚拟链路工作带宽和在其上分配的保护带宽.

$$\forall (u, v) \in E: \sum_{\forall (\hat{u}, \hat{v}) \in \hat{E}} x_{uv}^{\hat{u}\hat{v}} \geq 1 \quad (4)$$

$$\forall (u, v) \in E: \sum_{\forall (\hat{u}, \hat{v}) \in \hat{E}} (b_{uv} + s_{uv}) \leq b_{uv} \quad (5)$$

(3) 可生存性限制:式(6)确保一条底层 IP 链路不能同时承载两个保护相关的 SRG 中的链路.  $d_i$  和  $d_j$  表示不同的 SRG. 式(7)确保虚拟链路不能和它的保护路径共享一条 IP 层链路,以保证当底层 IP 网络单链路失效时的虚拟网络的可生存性.

$$\forall (u, v) \in E, \forall (\hat{u}, \hat{v}) \in d_i, \forall (\hat{x}, \hat{y}) \in d_j, i \neq j: d_i^{\hat{u}\hat{v}} + d_j^{\hat{x}\hat{y}} + x_{uv}^{\hat{u}\hat{v}} + x_{vu}^{\hat{x}\hat{y}} + x_{uv}^{\hat{x}\hat{y}} + x_{vu}^{\hat{u}\hat{v}} \leq 3 \quad (6)$$

$$\forall (u, v) \in E, \forall ((\hat{u}, \hat{v}), (\hat{x}, \hat{y})) \in \hat{E} \times \hat{E}(\hat{u}, \hat{v}) \neq (\hat{x}, \hat{y}): x_{uv}^{\hat{u}\hat{v}} + x_{uv}^{\hat{x}\hat{y}} + x_{vu}^{\hat{u}\hat{v}} + x_{vu}^{\hat{x}\hat{y}} + x_{uv}^{\hat{x}\hat{y}} + x_{vu}^{\hat{u}\hat{v}} \leq 2 \quad (7)$$

(4) IP-to-OTN 链路映射限制:式(8)确保新建的 IP 链路被映射到 OTN 层.式(9)表示 OTN 要满足 IP 链路需求的带宽能力.

$$\forall (u, v) \in E, (\bar{u}, \bar{v}) \in \bar{E}: z_{uv}^{uv} \leq \gamma_{uv} \quad (8)$$

$$\forall (\bar{u}, \bar{v}) \in \bar{E}: \sum_{\forall (u, v) \in E} z_{uv}^{uv} \times b_{uv} \leq b_{\bar{u}\bar{v}} \quad (9)$$

## 4 启发式算法 VNP-SVNME

在第 3 节中,我们讨论并给出了多层网络 SVNME 问题的数学模型,对于小规模问题,该模型通过 GLPK 等数学工具可以快速得出最优解.但是,对于较大规模问题,该方法求解的时间复杂度无法满足在线虚拟网络映射需求.所以本节设计一种高效的启发式算法

VNP-SVNME,在映射时间和映射效率上做一个折衷.

算法主要分为两个阶段:首先为虚拟网络中的每条虚拟链路寻找并分配最优保护带宽,确定不相交映射约束,然后按照该约束进行多层网络映射,最小化映射开销.算法的具体流程如下所示:

### VNP-SVNME 算法流程

- 步骤 1 对虚拟网络中每条虚拟链路的保护能力进行评估,设置权重;
- 步骤 2 选择映射节点  $u$ ,按  $u$  的度进行降序排列,如果两个  $u$  度相同,则任意选择一个即可;
- 步骤 3 根据步骤 1 的评估结果,为节点  $u$  相邻的虚拟链路选择后备保护路径,并分配最优保护带宽.然后确定虚拟链路映射的不相交约束.
- 步骤 4 将虚拟节点  $u$  及相邻链路映射到 IP 层网络,如果无法找到满足节点能力需求的底层节点时,则执行步骤 6,否则根据位置约束建立节点映射集合,然后选择总映射开销最小的底层节点进行映射.如果 IP 层链路资源不能满足节点  $u$  相邻链路的映射需求或现有映射代价高于新建 IP 链路映射代价,则新建 IP 链路,然后将新建链路映射到 OTN 层,成功则返回执行步骤 2,若全部映射完成,则执行步骤 5,否则,执行步骤 6.
- 步骤 5 输出最终虚拟网络映射方案,更新 IP 层网络拓扑信息.
- 步骤 6 映射失败,拒绝该虚拟网络请求.

## 5 实验评估和结果分析

### 5.1 实验设置

我们使用 GLPK 工具求得 ILP 的解,使用 C++ 实现启发式算法,并将其在虚拟网络映射平台上进行验证.算法执行机器的硬件配置为 4 \* 8core 2.4GHz Intel Xeon E5 CPU 和 256GB 的存储.由于目前还没有公开的真实可用的多层网络拓扑<sup>[3]</sup>,因此我们将常用的单层拓扑合成了多层网络拓扑.对于每个 OTN 网络,我们将其规模控制在 15 到 100 个节点.对于每个 OTN,在其上形成一个 IP 拓扑,节点数量是 OTN 的 60%,IP 层的每个节点和 OTN 拓扑中的一个节点相连.OTN 链路被赋予 50Gbps 的能力,IP 链路被随机分配了 10 ~ 20Gbps 的能力.对于每个 IP 和 OTN 的组合,我们随机生成 20 个虚拟网络,节点数量为 4 ~ 8,每对节点间至少有两条链路相连,每个虚拟网络的生存时间为 500s,这些参数设置和先前研究<sup>[3]</sup>保持一致.

### 5.2 比较算法和评估参数

本文将 ILP 方法和 VNP-SVNME 启发式算法在映射资源开销和算法的平均执行时间方面进行了比较.此外,为了更好的说明启发式算法的优点,我们用文献[4]和文献[5]的保护方法分别实现了基于 SN 层保护的多层映射算法 Hybrid-SNP(1:1 保护)和 Pardalis-SNP(共享保护),以及用文献[8]方法实现了基于 VN 层保

护的多层映射算法 Svnlpn-VNP(扩展虚拟拓扑),并将它们与本文提出的 VNP-SVNME 算法在资源映射开销方面进行了比较.具体比较参数说明如下:

(1)映射资源开销比:指两种方法解决同一问题所花费资源的比值(启发式/ILP),体现两者的相对性能.

(2)算法平均执行时间:两种方法映射同一个虚拟网络请求平均所花费的时间.

### 5.3 实验结果

首先,我们将启发式算法 VNP-SVNME 求得的解与 ILP 方法所得的最优解进行了对比,结果表明 VNP-SVNME 算法在资源开销和执行时间上取得了有效的折衷,具体数据细节如下:

(1)两种方法的映射开销比较.如图 2 所示,横坐标为 IP 节点的数量,纵坐标为启发式相对最优解的映射开销比.为了降低虚拟节点映射顺序对映射开销的影响,我们实验了启发式算法 50 次,每次使用不同的映射顺序然后求解.我们通过观察结果发现,大约 30% 的虚拟网络的映射开销仅比最优解高出 10%.从整体平均结果来看,大概是最优算法的 1.15 倍.

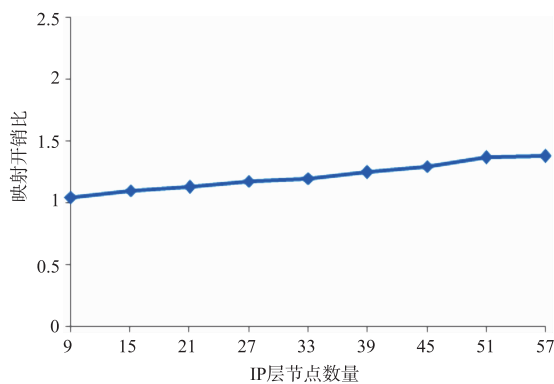


图2 VNP-SVNME映射开销比

(2)两种方法在时间效用方面的对比.如图 3 所示,横坐标为 IP 节点的数量,纵坐标为平均执行时间.由图可以看出,启发式算法平均比最优算法快了将近 400 倍.其时间维持在几秒到几十秒之间,基本能够满足在线虚拟网络映射的时间需求.

然后,我们将本文提出的 VNP-SVNME 算法与其它三种启发式算法在资源映射开销方面进行了实验对比.如图 4 所示,结果表明,基于 VN 层保护模式的 VNP-SVNME 算法和 Svnlpn-VNP 算法在资源映射开销上要优于基于 SN 层保护模式的其它两种算法,该结果也验证了文献[13]的结论,说明了基于 VN 层保护的算法相比 SN 层保护算法在资源使用方面的有效性.更重要的是,我们所设计的 VNP-SVNME 算法的映射开销要优于 Svnlpn-VNP 算法,因为 Svnlpn-VNP 算法需要在 VN 层改变拓扑结构,增加额外的链路来进行保护,而

VNP-SVNME 不需要.

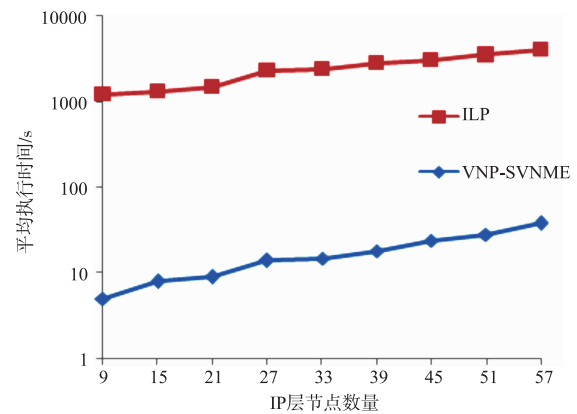


图3 算法平均执行时间

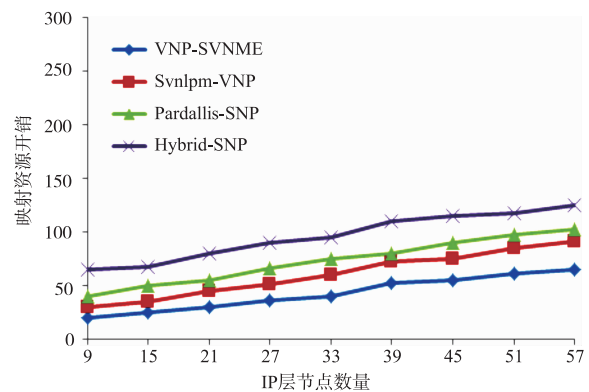


图4 资源映射开销

## 6 结论

本文研究了基于 VN 层保护的 SVNME 问题.对其建立了数学规划模型,小规模问题可以获得最优解.针对大规模问题,我们设计了一种高效的启发式算法 VNP-SVNME,实验结果表明其在映射开销和映射时间上进行了有效的折衷,且优于比较的启发式算法.在下一步工作中,将在此基础上进行多层网络映射节点可生存性方面的研究.

### 参考文献

- [1] Zhao X, Vusinkala V, Koley B, et al. The prospect of inter-data-center optical networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(9): 32-38.
- [2] Fischer A, Botero J F, Beck M T, et al. Virtual network embedding: A survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4): 1888-1906.
- [3] Chowdhury S R, Ayoubi S, Ahmed R, et al. Multi-layer virtual network embedding [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2018, 15(3): 1132-1145.
- [4] Rahman M R, Boutaba R. SVNE: Survivable virtual network embedding algorithms for network virtualization [J].

- IEEE Transactions on Network and Service Management, 2013,10(2):105–118.
- [5] Chen Y, Li J, Wo T, et al. Resilient virtual network service provision in network virtualization environments [A]. Proc IEEE ICPADS [C]. IEEE, 2010. 51–58.
- [6] Yin S, Huang S, Liu H, et al. Survivable multipath virtual network embedding against multiple failures for SDN/NFV [J]. IEEE Access, 2018, 6:76909–76923.
- [7] Shahriar N, Ahmed R, Chowdhury S R, et al. Generalized recovery from node failure in virtual network embedding [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2017, 14(2):261–274.
- [8] Su Y, Meng X, Kang Q, et al. Survivable virtual network link protection method based on network coding and protection circuit [J]. IEEE Access, 2018, 6:67477–67493.
- [9] Shahriar N, Ahmed R, Chowdhury S R, et al. Connectivity-aware virtual network embedding [A]. Proc IFIP Networking [C]. IFIP, 2016. 46–54.
- [10] Wang W, Lin Y, Zhao Y, et al. First demonstration of virtual transport network services with multi-layer protection schemes over flexi-grid optical networks [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(2):260–263.

#### 作者简介



**刘光远** 男, 1981 年出生, 河北石家庄人。于北京邮电大学获得博士学位, 现为石家庄铁道大学信息学院教师。主要研究方向为云计算、网络虚拟化。

E-mail: gyuanliu@163.com



**徐明伟** 男, 1971 年出生, 辽宁朝阳人。清华大学教授, 主要研究方向为网络体系结构、下一代互联网、网络空间安全。